



**SAVONIA**

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO  
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

# RUNKOAINEEEN JA NOTKIS- TIMEN VAIKUTUS RUISKU- BETONIN LAATUUN

TEKIJÄ: Juha Palviainen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala			
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma			
Työn tekijä Juha Palviainen			
Työn nimi Runkoaineen ja notkistimen vaikutus ruiskubetonin laatuun			
Päiväys	25.4.2014	Sivumäärä/Liitteet	42
Ohjaaja(t) Juha Pakarinen, pt. tuntiopettaja; Raimo Lehtiniemi, lehtori			
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Normet Oy			
<p>Tiivistelmä</p> <p>Opinnäytetyössä tutkittiin runkoaineen ja notkistimen vaikutusta ruiskubetonin laatuun. Työssä tutkittiin pystyykö yksinkertainen maan alle sijoitettava murskauslaitos tuottamaan ruiskubetonin lujitukseen tarvitavan kiviaineksen. Tavoitteena oli että murskauslaitoksen, yhden murskausvaiheen kiviainesta seulomalla ja siihen notkistinta lisäämällä tuorebetoni- ja lujuustestien tulokset saataisiin standardien mukaisille ohjealueille. Työ tehtiin Normet Oy:n tarpeisiin.</p> <p>Koeasettelussa käytettiin Taqushin L4-ortogonaalimatriisia, jonka avulla suoritettavien kokeiden määrä pystyttiin pitämään mahdollisimman pienenä. Muuttujia kokeissa olivat reakokojakauma, raemuoto ja notkistimen määrä. Työssä valmistettiin neljä erilaista betonimassaa, joille suoritettiin lämpötilaseurantaa, tuorebetoni- ja lujuustestejä. Työssä noudatettiin pääosin standardeja, lukuunottamatta tilaajan kanssa sovittua poikkeusta. Standardeista poikettiin pulttipyssyllä testattavien laattojen minimimitoista. Työssä on tarkasteltu toteutuksen kaikki vaiheet ja kerrotaan kuinka kokeet käytännössä tehtiin. Tulokset ja tulosten analysointi on käsitelty yleisesti. Laboratoriokokeet tehtiin Savonia-ammattikorkeakoulun tiloissa.</p> <p>Tutkimuksessa löydettiin suuntaviivat sille kuinka asetetut muuttujat vaikuttivat testimassoihin. Testeistä saatiin selville kuinka käytetty kiviaines ja notkistin vaikuttivat testattujen massojen laatuun. Muuttuvien tekijöiden väliltä löydettiin eroja, jotka vaikuttivat betonin pumpattavuuteen ja lujuuteen. Testimassoista saaduissa tuloksissa oli eroja suhteessa toisiinsa. Osa testimassoista pääsi tavoitelluille ohjealueille. Tilaajana toiminut yritys hyödyntää tutkimuksen tuloksia omiin tarpeisiinsa.</p>			
Avainsanat Lujuus, Betoni, Ruiskubetoni, Ortogonaalimatriisi			
Tulosten osalta luottamuksellinen			

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme In Construction Engineering			
Author Juha Palviainen			
Title of Thesis Effect of Properties of Aggregate and Plasticizer on Shotcrete			
Date	25.4.2014	Pages/Appendices	42
Supervisors Juha Pakarinen, Full-time Teacher; Raimo Lehtiniemi, Lecturer			
Client Organisation /Partners Normet Oy			
<p>Abstract</p> <p>The purpose this thesis was to study the effect of properties of the aggregate and plasticizer on the quality of shotcrete. The subject of the investigation was the aggregate which was produced by a simple underground crushing plant. An ambition was to obtain shotcrete to meet the standards by using crushing plant screened aggregate and a certain plasticizer. The work was commissioned by Normet Oy.</p> <p>The Taguchi L4 orthogonal array was used in this thesis to keep the amount of experiments small. The variables in the experiments were the particle size distribution, the particle shape and the amount of plasticizer. Four different concrete types were produced and tested. The tested matters were the temperature development, fresh concrete tests and strength tests. All tests except one were made according to the standards. The dimensions of bolt-driving test slabs were smaller than they should normally have been. Every step of the experiments were described and made in practice. The laboratory tests were made in the premises of Savonia University of Applied Sciences.</p> <p>As a result of this work was information on how the used aggregate and the plasticizer effected on the quality of shotcrete. Differences were found on how the variables affected the pumpability and strength of the shotcrete. Some of the tested concretes met the standards. The client company will use the results for its own needs.</p>			
<p>Keywords Strength, Concrete, Shotcrete, Orthogonal array</p>			
Results are confidential			

## ESIPUHE

Kiitän Normet Oy:tä mahdollisuudesta tehdä tämä insinöörityö. Suuret kiitokset Jaakko Ruuskaselle, joka toimi Normet Oy:n edustajana ja mahdollisti tämän opinnäytetyön tekemisen. Kiitos myös opinnäytetyötä ohjanneelle Juha Pakariselle.

Laboratoriossa suureksi avuksi olivat Eemeli Lehmusoksa, Juha Lehtikanto ja Tapani Savolainen. Kiitos teille.

Kiitän suuresti kotijoukkojani siitä, että jaksoitte pitää hyvää huolta tuoreista kaksotyöistämme, kun itse tein töitä opinnäytetyön parissa. Ilman teidän tukeanne työ ei olisi valmistunut. Kiitos rakkaalle vaimolleni ja rakkaille vanhemmilleni.

Joensuussa

Juha Palviainen

## SISÄLTÖ

1	JOHDANTO.....	9
1.1	Tausta ja tavoitteet.....	9
1.2	Yritys .....	10
2	TESTIBETONIMASSOISSA KÄYTETYT MATERIAALIT JA KOESUUNITTELU.....	11
2.1	Ruiskubetoni .....	11
2.2	Betonin runkoaine.....	11
2.3	Sementti ja notkistin.....	12
2.4	Koesuunnittelu .....	12
3	RUNKOAINEEN KÄSITTELY .....	14
3.1	Kuivatus.....	14
3.2	Runkoaineen seulonta ja seulontalaitteisto .....	15
3.3	Runkoaineen välppäys.....	19
3.3.1	Litteysluku .....	21
4	NEW ZEALAND FLOW CONE .....	23
4.1	Testilaitteiston valmistus ja testin valmistelu .....	23
4.2	Flow Conen suoritus .....	25
5	KOEOHJELMAN SUUNNITTELU JA VALMISTELU .....	28
5.1	Koeohjelman suunnittelu .....	28
5.2	Tarvittavat muotit ja testausvälineet .....	29
5.2.1	Tunkeumaneula Penetration needle .....	30
5.2.2	HILTI DX 450 naulain.....	31
6	MASSOJEN VALMISTUS, TUOREBETONITESTIT JA MUOTTEIHIN VALU .....	32
6.1	Massojen valmistus .....	32
6.2	Tuorebetonitestit painuma ja leviämä .....	33
6.3	Muotteihin valu .....	33
7	VARHAISLUJUUS .....	35
7.1	Neulantunkeumamenetelmä Penetration Needle test .....	35
7.2	Pulttipyssymenetelmä Stud driving .....	35
8	PURISTUSLUJUUS .....	37
9	TULOSTEN ANALYSOINTI JA VIRHELÄHTEET .....	38
9.1	Analysointi .....	38

9.2 Virhelähteet.....	39
10 PÄÄTELMÄT .....	40
LÄHTEET .....	41

## Määritelmät

**Betoni** on materiaali, joka on valmistettu sekoittamalla sementtiä, karkeaa ja hienoa kiviainesta ja vettä ja mahdollisesti lisäaineita ja seosaineita ja jonka ominaisuuksien kehittyminen aiheutuu siitä, että sementti kovettuu.

**Filleri** on kiviainesta, joka läpäisee 0,063 mm:n seulan.

**Irtotiheys** on osamäärä joka saadaan, kun tietyn kokoisen näyteastian täyttämän, tiivistymättömän, kuivan kiviaineksen massa jaetaan tämän astian tilavuudella.

**Kiviaineksen reakoko** määritellään alemman seulakoon (d) ja ylemmän seulakoon (D) avulla. 1.0/2.0 pienin rae on kooltaan 1 mm:ä ja suurin hieman alle 2 mm:ä.

**Kiviaines** on rakeinen materiaalin, jota käytetään rakentamisessa. Kiviaines voi olla luonnollista, valmistettua tai kierrätettyä. Kiviaines on betonin rakeinen, mineraalinen osa-aine, joka semettiliiman yhteenliittymänä muodostaa betonin.

**Leviämällä** tarkoitetaan leviämäpöydälle levinneen betonin, leviämäpöydän reunojen suuntaisten suurimpien mittojen keskiarvoa.

**Notkistin** on lisäaine, joka tekee betonimassasta notkeampaa. Notkistin vähentää vedenkäyttötarvetta. Tämän lisäaineen avulla saadaan laskettua vesisementtisuhdetta, joka tekee betonista loppulujuudeltaan kovempaa.

**Painumalla** tarkoitetaan betonin ja painumakartion huippujen etäisyyttä; painumakartiossa ja ilman painumakartiota, kun kartio on nostettu pois ja betoni on painunut alas.

**Puristuslujuus** on lujuus, jonka testattava betoni kestää rikkoontumatta. Lopullinen lujuus testataan yleensä 28 vuorokauden jälkeen, jolloin betonilujuus on saavuttanut lähes koko kapasiteettinsa. Ilmoitetaan Megapascalina.  $1 \text{ Mpa} = 10 \text{ kg/cm}^2$ .

**Ruiskubetoni** koostuu massasta, jossa on sementtiä, kiviainesta ja vettä, sekä hyvin useasti lisäaineita. Betoni ruiskutetaan lujitettavalle pinnalle suuttimen läpi hyvin suurella nopeudella paineilmaa apuna käyttäen. Ennen ruiskutusta betoniin sekoitettavien kuitujen käyttö on myös yleistä. Ruiskutetun betonin tulisi muodostaa lujitettavalle pinnalle tiivis ja homogeeninen kerros.

**Sementti** hienojakoinen epäorgaaninen materiaali, joka sekoitettuna veden kanssa muodostaa hydrataatioreaktioiden ja prosessien seurauksena kovettuvan pastan, joka kovettumisen jälkeen säilyttää lujuutensa ja pysyvyytensä jopa veden alla.

**Lisäaine** on materiaali, jota lisätään betonia sekoittaessa sementin massaan verrattuna pieniä määriä betonimassan tai kovettuneen betonin ominaisuuksien muuttamiseksi.

**Sementtirunkoainesuhde** on suhde, joka saadaan jakamalla sementin määrä runkoaineen määrällä.

**Seulonnalla** tutkitaan kiviaineksen reakokojakaumaa, sitä minkä verran mitäkin reakokoa tutkittava kiviaines sisältää

**Varhaislujuus** on lujuus, joka voidaan mitata betonista yleensä ensimmäisen vuorokauden aikana. Varhaislujuutta voidaan mitata neulantunkeumamenetelmällä ja pulittipyssymenetelmällä.

**Vesi-sementtisuhde** on betonimassan tehollisen vesimäärän ja sementtimäärä (massamäärien) suhde. Saadaan selville jakamalla veden määrä sideaineen eli sementin määrällä.

**Välppäyksellä** tutkitaan kuinka suuri osa tutkittavasta kiviaineksesta on muotoarvoltaan litteää.



# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tausta ja tavoitteet

Luonnonsoran käyttöä vähennetään ja kielletään koko ajan portaittain (Jaakko Ruuskanen, Normet Oy, 1.3.2013). Soranottoaikat vähenevät, joten on siis tärkeää hyödyntää mahdollisimman tehokkaasti työmaakohteissa tai kaivostoiminnan ohessa syntyvä kiviaines. Kaivostoiminnan ohessa syntyvän sivukiven hyötykäyttö on kestävä kehityksen mukaista toimintaa. On myös järkevämpää käyttää lähellä olevaa kiviainesta kuin että se kuljetettaisiin pitkien matkojen päästä. Mitä lyhyempi kuljetusmatka, sitä tehokkaampaa, taloudellisempaa ja ympäristöystävällisempää toiminta on kokonaisuutena tarkastellen. Vuoden 2010 syksyllä valmistunut Suomen mineraalistrategia painottaa muun muassa kiviainesten kierrätyksen ja uusiokäytön kehittämisen tärkeyttä. Strategian tavoitteellisissa toimenpide-ehdotuksissa sanotaan että koneiden, laitteiden ja prosessien materiaali- ja energiatehokkuutta parannetaan ja samaan aikaan luodaan kannusteita sivukivien, rikastushiekkojen, rakennusmassojen ja mineraalituotteiden kierrätykselle ja uusiokäytölle. (Geologian tutkimuskeskus 2010, 17.)

Luonnonsora on aikojen kuluessa luonnon muovaamana muuttunut melko pyöreäksi. Se on muotoarvoltaan siis erittäin hyvää. Pyöreä ja sileä runkoaines vähentää betonin valmistukseen tarvittavan sementin määrää. Murskatulla kiviaineksella on enemmän pinta-alaa, joten se vaatii enemmän sementtiä ja näin ollen se tarvitsee myös enemmän vettä. Vesimäärän lisäys suurentaa vesi-sementti suhdetta ja tämä heikentää betonin lujuutta. (by 43 2009, 20.)

Opinnäytetyön tilaajana toimii Normet Oy. Työn tarkoituksena on selvittää saadaanko yksinkertaisella murskausprosessilla tuotetusta runkoaineesta laatukselliset täytettävää ruiskubetonia. Työssä tutkitaan pystyykö yksinkertainen maan alle sijoitettava murskauslaitos tuottamaan ruiskubetonin lujuuteen tarvittavan kiviaineksen. Tavoitteena on että murskauslaitoksen, yhden murskausvaiheen kiviainesta seulomalla ja siihen notkistinta, sementtiä ja vettä lisäämällä testien tuloksia saadaan standardien mukaisille ohjealueille.

Koeasettelussa käytetään Taqushin L4-ortogonaalimatriisia, jonka avulla suoritettavien kokeiden määrä pystytään pitämään mahdollisimman pienenä. Muuttujia kokeissa ovat reakokajakauma, raemuoto ja notkistimen määrä. Työssä valmistetaan neljä erilaista betonimassaa, joille suoritetaan lämpötilaseurantaa, tuorebetoni- ja lujuustestejä. Kokeet suoritetaan Savonia-ammattikorkeakoulun tiloissa. Tässä opinnäytetyössä selostetaan millaista testeissä käytettävä materiaali on ja kuinka se käsitellään testeihin soveltuvaan muotoon. Työssä käsitellään testikohteille suoritettavat testit ja tulosten analysointi. Tulokset käsitellään yleisesti.

## 1.2 Yritys

Kansainvälisellä Normet Oy:llä on yli 50 vuoden kokemus maanalaisten kaivosten ja tunneleiden rakentamiseen tarvittavien laitteiden kehittämisestä, tuotannosta ja myynnistä. Tämän lisäksi Normet Oy tarjoaa rakennuskemikaaleja, asiakasprosesseja tehostavia kokonaisratkaisuja ja moninaisia palveluja laitteiden huoltoon ja käyttöön sekä maanalaisen rakentamisen prosesseihin. Yli 9 000 toimitetun laitteen myötä Normet Oy on yksi markkinoiden johtavista yrityksistä tuotesegmentissään. Normetin tavoitteena on parantaa ihmisten työturvallisuutta mekanisoimalla ja automatisoimalla kaikkein vaarallisimpia ja riskialttiimpia louhintaprosessin työvaiheita. Normetin maanalaisiin asiakasprosesseihin kuuluvat seuraavat tuotteet ja palvelut: Betoniruiskutus ja kuljetus, räjähdysaineiden panostus, nosto- ja asennustyöt, maanalainen logistiikka ja rusnaus ja varaosa- ja huoltopalvelut.

Yhtiön pääkonttori sijaitsee Iisalmessa, missä sijaitsee yhtiön konsernihallinto sekä tuotteiden ja palvelujen tuotekehitys. Tuotantoa Normetilla on Iisalmessa, Santiagossa, Chilessä ja Ludvikassa, Ruotsissa. Yrityksessä on lähes 1000 työntekijää. Myynti- ja tukitoimi pisteitä on 37 kappaletta 24:ssä eri maassa. Verkostoa koordinoidaan Sveitsistä Normet International Ltd:stä käsin. Normet-konsernin liikevaihto oli vuonna 2012 noin 230 miljoonaa euroa. Normetin laatu järjestelmä on sertifioitu ISO 9001-standardin mukaisesti. Tämän lisäksi Normetilla on ISO 14001 ympäristö-sertifikaatti ja OHJAS 18001 turvallisuustodistus.

## 2 TESTIBETONIMASSOISSA KÄYTETYT MATERIAALIT JA KOESUUNITTELU

### 2.1 Ruiskubetoni

Ruiskubetonia valmistetaan kahdella eri menetelmällä: märkäseosmenetelmällä ja kuivaseosmenetelmällä. Kuivaseosmenetelmässä runkoaine ja sementti syötetään paineilmalla ruiskusuuttimeen, jossa sekaan lisätään vesi. Märkäseosmenetelmässä valmisbetonimassa pumpataan ruiskusuuttimelle, josta se paineilman avulla ruiskutetaan haluttuun kohteeseen. Kuivaseosmenetelmä aiheuttaa enemmän hukkaroiskeita suhteessa märkäseosmenetelmään. Kuivaseosmenetelmän käyttö onnistuu myös ahtaissa pienissä ja ahtaissa tiloissa, märkäseosmenetelmä tarvitsee enemmän tilaa joutuksen sen tarvitsemasta suuremmasta laitteistosta. (Melbye 2006, 15 - 16, 22 - 24, 27.)

Ruiskubetonille oleellista on hyvä pumpattavuus, työstettävyyys ja riittävä lujuus. Tuorebetonitesteillä pyrittiin todentamaan testattavien betonimassojen notkeutta. Painuma ilmentää testattavan massan pysyvämpää tilaa. Se kertoo esimerkiksi siitä kuinka massa käyttäytyy kun sitä kuljetetaan valmistamolta työkohteeseen. Leviämä kertoo siitä kuinka massa käyttäytyy pumppauksen suhteen. Jos leviämätestien tulokset ovat alle ohjearvojen, on massa jäykkää ja pumppauspainetta joudutaan kasvattamaan. Tällöin massa on siis vaikeammin pumpattavaa. Jos tulokset ovat yli ohjearvojen, on vaarana että vesi ja runkoaineen hienoaines alkavat erottua muusta massasta. Tämä saattaa aiheuttaa sen että laitteistoon tulee tukos, jonka aiheuttaa massan karkeampi, liikkumaton kiviaines.

Ruiskubetonimassan runkoaineen tulee olla kunnossa. Siinä tulee olla riittävästi hienoja materiaaleja ja runkoaineen muodon tulee olla riittävän pyöreää. Jos runkoainetta säilytetään ulkotiloissa, tai-vasalla tulee käytettävän runkoaineen kosteus tarkastaa säännöllisin väliajoin.

### 2.2 Betonin runkoaine

Testeissä käytetty kiviaines saatiin tilaajalta. Kivimateriaali oli syntynyt kaivostoiminnan oheismateriaalina. Testeihin oli käytettävissä, yksinkertaisella murskausprosessilla, keskipakoismurskaimella, 70 m/s, 60 m/s ja 50 m/s roottorin nopeuksilla murskattua kiviainesta. Näistä testeihin valittiin 70 m/s ja 50 m/s nopeuksilla murskatut kiviainekset. Raekoko näissä kiviaineksissa vaihteli 0 - 10 mm:iin. Murskaimeen syötetty kiviaines oli raekooltaan 25 mm:ä. Nämä kiviainekset (50 m/s ja 70 m/s) valitsemalla pyrittiin varmistamaan riittävä litteämmän kiviaineksen määrä tehtäviä testimassoja varten. Osaan testimassoista tarvittiin riittävä määrä litteää runkoainetta. Suuremmalla murskauslaitteiston roottorin nopeudella murskattu kiviaines ei sisällä niin paljon litteämpää kiviainesta kuin hitaammalla roottorin nopeudella murskattu kiviaines (Jaakko Ruuskanen 1.3.2013). Näin ollen 50 m/s nopeudella murskatussa kiviaineksessa on suhteessa enemmän litteämpää kiviainesta kuin 70 m/s nopeudella murskatussa kiviaineksessa.

Mikäli murskattava kivi on kovaa ja murskeen haluttu muoto on vaikea saavuttaa puristavalla murskauksella, voidaan haluttu muoto saavuttaa keskipakoismurskaimella. Seuraavilla tekijöillä voidaan parantaa keskipakoismurskaimen lopputuotteen muotoa (by 43 2009, 56):

- käyttämällä suurta syöttöastetta
- syötteen pienellä hienoainesmäärällä

- korkealla roottorin kierrosnopeudella
- kivikehällä.

Betonissa käytetty runkoaine ei saa sisältää liikaa litteää kivimateriaalia, sillä se heikentää betonin lopullista lujuutta. Luonnon muovaama pyöreämuotoisempi kivi on luonnostaan hyvää runkoainemateriaalia. Suhteessa litteämpään ja murskattuun kiviainekseen, sillä on vähemmän pinta-alaa ja enemmän tilavuutta. Litteä rae ei pysty myöskään ottamaan vastaan yhtä suurta kuormaa kuin vastaavan kokoinen pyöreämpi rae. Pyöreä rae tarvitsee vähemmän ”liimaa” eli sementtiä rakenteen yhteenliittymiseen ja sillä on parempi puristuslujuus kuin litteällä rakeella. Betonimassa, jossa on liikaa litteämuotoisia rakeita, ei myöskään välttämättä tiivisty riittävän hyvin, jolloin betonin lopullinen lujuus alenee. Suurempi pinta-ala tarvitsee enemmän ”sementtipastaa” ja tietyn rajan jälkeen sitä ei enää ole riittävästi kaikkien rakeiden väliin. Tästä johtuen betonimassan sisäinen kitka lisääntyy, massan työstettävyys heikkenee ja tiivistäminen vaikeutuu. (Järvenpää 2001, 49.)

50 m/s ja 70 m/s nopeudella murskatuille kiviaineksille suoritettiin seulonta ja tämän perusteella piirrettiin rakeisuuskäyrät. Tällä varmistettiin kyseessä olevan oikeat, testejä varten aiotut kiviainekset. Toimitetuista kiviaineksista piirretyt rakeisuuskäyrät vastasivat tilaajan aiemmin toimittamia testikiviainesten rakeisuuskäyriä.

### 2.3 Sementti ja notkistin

Sementti toimii betonissa sideaineena ja ”liimana”, joka sitoo runkoaineen yhteen. Sementiksi valittiin tavallinen rautakaupasta saatava, normaalisti kovettuna Portland-seossementti, Plussementti (CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N). Sementti on CE-merkitty ja täyttää standardin SFS-EN 197-1 vaatimukset. Sementti ei ollut muuttuvana tekijänä suoritettavissa laboratoriotesteissä. Oleellista testien onnistumisen kannalta oli, että samaa sementtiä käytettiin kaikissa testattavissa betonimassoissa.

Betonin työstettävyyttä parannetaan notkistimilla. Notkistimen käytöllä saavutetaan seuraavia etuja: työstettävyys paranee, vesimäärää voidaan vähentää ja varhaislujuuden kehitys nopeutuu. Testeissä käytetty notkistin saatiin opinnäytetyön tilaajalta. Testeissä käytettiin TamCem 60 notkistinta, joka soveltuu ominaisuuksiltaan hyvin ruiskubetonille. Testimassoissa käytetty notkistimen määrä vaihteli 0,3 %:sta 1,2 %:iin sideaineen, eli sementin määrästä. Notkistin sekoitettiin betonimyllyyn laitettavan veden sekaan hetkeä ennen testibetonimassan valmistuksen aloittamista. Sekoitusajankohta oli jokaisen testimassan kohdalla sama.

### 2.4 Koesuunnittelu

Taguchi-menetelmä on tuote- ja prosessisuunnitteluun kehitetty laadun optimointimenetelmä. Sillä on samanaikaisesti laatua nostava ja kustannuksia alentava vaikutus. Menetelmän nimi tulee sen keksijästä, japanilaisesta tohtori Genichi Taguchista (1924 - 2012), joka kehitti menetelmäänsä yli 50 vuotta. Klassiset koemenetelmät, joissa yhtä muuttuvaa tekijää testataan kerrallaan, vievät paljon rahaa, aikaa ja resursseja, koska kokeita joudutaan tekemään paljon. Käyttämällä taguchin ortogonaalimatriisia päästään paljon pienempiin koemääriin, se säästää aikaa ja materiaalia, tulos on luotettava ja se on toistettavissa. (Karjalainen 1989, 3, 55.)

Koesuunnitelun pohjana oli Taguchin L4 ortogonaalimatriisi. Sen avulla kolmen eri muuttujan aikaan saamat vaikutukset saatiin selville neljällä kokeella. Klassista menetelmää käyttämällä, missä kaikki erilaiset kombinaatiot testataan erikseen, testejä olisi pitänyt suorittaa kahdeksan kappaletta. Opin- näytetyössä suoritettavien testien runko tuli opinnäytetyön antajalta. Sen lähtökohtana oli Taqushi- menetelmä, jonka avulla testausmäärä pystyttiin pitämään mahdollisimman pienenä. Lopputulokse- na oli neljä erilaista testibetonimassaa, jotka erosivat toisistaan. Runkoainejakauma, raemuoto ja notkistimen määrä olivat muuttujina näissä testimassoissa.

Taulukko 1. Testimassojen kokoonpanot eri muuttujilla. Fillerillä tarkoitetaan tässä alle 0,063 mm:n kiviainesta.

Testi	Raejakauma	Partikkeli-muoto	Notkistin	
1	0-4 mm	FI=0	0,30 %	(4 % filleriä)
2	0-4 mm	FI=30	1,20 %	(4 % filleriä)
3	0-16 mm	FI=0	1,20 %	(2 % filleriä)
4	0-16 mm	FI=30	0,30 %	(2 % filleriä)
Sementtirunkoainesuhde = 0,27				
Vesisementtisuhde = 0,43				

### 3 RUNKOAINEEEN KÄSITTELY

#### 3.1 Kuivatus

Testejä varten saatu kiviaines oli ollut ulkosäilytyksessä yli vuoden. Se ei siis suoraan sellaisenaan käynyt testeihin. Säkeissä ollut kiviaines oli kosteaa ja talvisaikaan luonnollisesti jäässä (Kuva 1). Jo alkuvaiheessa mielessä oli ajatus siitä että paljon työtä ja aikaa vievän kiviaineksen seulonnan määrä pyrittiin pitämään niin vähäisenä kuin mahdollista.



Kuva 1. Jäätyneitä kiviainessäkkejä (Palviainen 22.2.2013)

Murskattua kiviainesta sisältäneet säkit siirrettiin sisälle Savonia-ammattikorkeakoulun betonilaboratorion tiloihin sulamaan. Neljän vuorokauden kuluttua tästä, alkusulamisen jälkeen, säkkien sisältämää kiviainesta levitettiin betonilaboratorion lattialle asetettujen muovien päälle esikuivumaan (Kuva 2). Sopiva esikuivaus aika, 30 kilolle kiviainesta, oli noin vuorokausi. Märän kiviaineksen esikuivaus vapaassa huoneilmassa lyhensi huomattavasti kiviaineksen tarvitsemaa kuivatusaikaa. Betonilaboratorion keskimääräinen lämpötila talvisaikaan oli noin 21 °C.

Kaikki testeissä käytetty kiviaines kuivatettiin uunissa 105 °C:ssa, kunnes ylimääräinen kosteus oli haihtunut. Riittävä uunikuivausaika, esikuivatetulle kiviainekselle tässä tapauksessa oli noin yksi vuorokausi. Tämä todennettiin riittävällä määrällä punnituksia, kunnes kiviaineksen massa ei tunnin aikana muuttunut enää 0,1 %:a enempää. Näiden punnituksen jälkeen, jokaista kuivattua kiviaineserää ei enää erikseen punnittu. (SFS-EN 933-1.)

Kuivatettava kiviaines laitettiin laakeisiin, metallisiin astioihin, noin kymmenen senttimetrin paksuisena kerroksena. Kuivausajan puolivälissä eli noin kahdentoistotunnin jälkeen kuivausastioissa ollut kiviaines sekoitettiin, siten että pohjalla ollut kiviaines nousi päällimmäiseksi. Tällä varmistettiin kaiken kiviaineksen kunnolla kuivaminen.



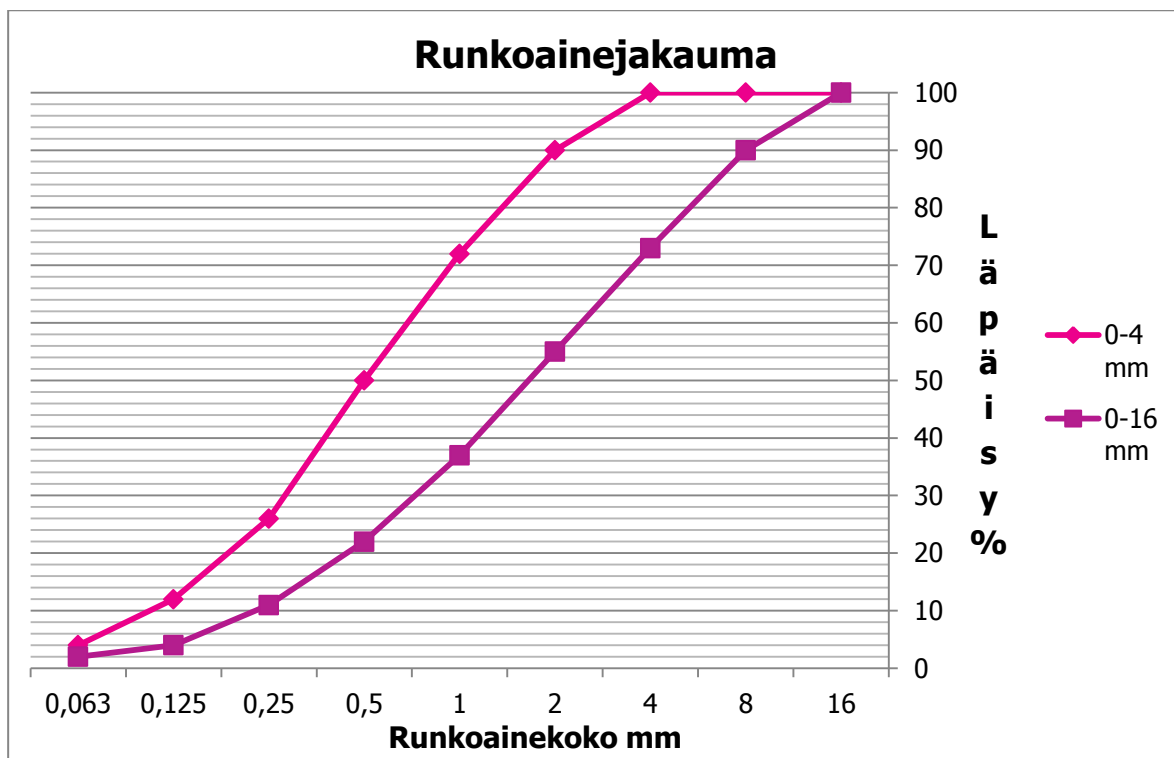
Kuva 2. 50 m/s runkoaineen esikuivatusta vapaassa huoneilmassa. (Palviainen 6.3.2013)

### 3.2 Runkoaineen seulonta ja seulontalaitteisto

Koeohjelman mukaisia testimassoja varten, testauksiin varattu kivimateriaali seulottiin tarkasti oikeisiin raekokojakaumiin eli fraktioihin. Testimassoja varten, oikeisiin fraktioihin seulotusta kiviaineksesta muodostettiin runkoainetta, jolla oli halutunlainen rakeisuuskäyrä (Kuvaaja 1).

Tarkka seulontamäärä ei ollut tiedossa heti seulontaa aloitettaessa. Seulontamäärä arvioitiin laskennallisesti tarvittavien testikappaleiden tilavuuksien pohjalta. Lopullinen määrä tarkastettiin pienen testimassan perusteella ja todettiin, ettei arvioitu määrä aivan riitä. Tämän perusteella lopullista seulontamäärää kasvatettiin.





Kuvaaja 1. Testimassojen kaksi erilaista runkoainejakaumaa

Runkoaineen seulontaa varten käytössä oli kolme pientä seulontasarjaa ja kaksi seulontalaitetta. Kuvassa 3 esiintyy yksi käytetyistä seulontakoneista ja seulasarjoista. Yritystoiminnassa käytetään yleensä suurempia seulasarjoja, joilla on mahdollista seuloa suurempia kiviainesmääriä kerralla.



Kuva 3. Seulontalaite ja seulasarja (Palviainen 9.4.2013)



Yhdellä seulasarjalla seulottiin kerralla enimmillään kahden kilogramman suuruinen kiviaines määrä. Tällä pyrittiin varmistamaan eri kiviaineskokojen kunnollinen erottuminen. Jokaista, kahden kilogramman kiviaines määrää seulottiin 20 minuuttia.

Kolmas, käytössä ollut seulasarja nopeutti aikaa vievää seulontaprosessia. Sen avulla katkokset seulontaprosessissa olivat lyhyitä. Seulontakoneet porrastettiin toimimaan noin seitsemän minuutin aikaerolla suhteessa toisiinsa. Kun yksi kiviaines määrä oli seuloutunut valmiiksi, pystyi tilalle heti laittamaan seulasarjan, jossa oli seulomatonta kiviainesta. Ennen seuraavan seulontasarjan valmistumista oli riittävästi aikaa tyhjentää edellinen seulontasarja ja täyttää se uudelleen seulomattomalla kiviaineksella.

Jokaiselle raekokojakaumalle varattiin oma, riittävän suuri sanko (Kuva 4). 70 m/s ja 50 m/s kiviaineksista seulottu aines eroteltiin omiin sankkoihinsa. Jokaiseen sankoon merkittiin siinä olevan kiviaineksen raekokojakauma ja murskausnopeus.



Kuva 4. Kuvassa vasemmalla 50 m/s ja oikealle 70 m/s nopeudella murskattua kiviainesta, jaettuna raekoon mukaan. Kiviaines odotti välppäyksen alkamista. (Palviainen 8.3.2013)

Testattavan kiviaineksen raekoko vaihteli 0 - 10 mm:iin. Testimassoihin tarvittiin kuitenkin pieni määrä raekooltaan yli 10 mm:n kiviainesta. Testien lopputuloksen kannalta ei ollut oleellista mistä tämä pieni, tarvittava määrä otetaan. Betoniin ominaisuuksiin vaikuttaa eniten (runkoaineen) hienopää (Ruuskanen, 19.3.2013). Tämä tarvittava määrä, 10 - 16 mm:n runkoainetta, saatiin Savonian yhdyskuntateknisiin testauksiin keskittyneeltä laboratoriolta, missä kiviaines oli myös murskattu.

Testimassoja varten tarvittavat, erilleen seulottavat fraktiot olivat:

0/0.063,  
0.063/0.125,  
0.125/0.25,  
0.25/0.5,  
0.5/1.0,  
1.0/2.0,  
2.0/4.0,  
4.0/5.6,  
5.6/6.3,  
6.3/8.0,  
8.0/10.0,  
10.0/12.5  
12.5/16.

Perusseulasarjan silmäkoot ovat:

0.063,  
0.125,  
0.25,  
0.5,  
1.0,  
2.0,  
4.0,  
8.0,  
16.0,  
31.5  
63.

Lisäseulasarja 1:n seulakoot ovat:

5.6,  
11.2,  
22.4  
45.

Lisäseulasarja 2:n silmäkoot ovat:

6.3,  
10.0,  
12.5,  
14.0,  
20.0  
40.0.

(by 43 2009, 14)

Kiviainesten seulonta aloitettiin perusseulasarjalla, johon oli lisättynä lisäseulasarja 2. Perusseulasarjasta poistettiin kaksi suurinta seulaa 31,5 ja 63, koska testattavassa kiviaineksessa ei ollut näin suuria kivirakeita.

Tarvittavaksi seulasarjaksi muodostui siis:

0.063,  
0.125,  
0.25,  
0.5,  
1.0,  
2.0,  
4.0,  
6.3,  
8.0,  
10.0,  
12.5.

Lisäseulasarjan 1 ja lisäseulasarjan 2 seuloja ei saa yhdistää keskenään (by 43 2009, 13).

Tästä syystä tarvittava 5.6/6.3 fraktio seulottiin erillisseulontana. Aiemmin seulottu 4.0/6.3 kiviaines seulottiin seuraavalla seulasarjalla:

0.063,  
0.125,  
0.25,  
0.5,  
1.0,  
2.0,  
4.0,  
5.6.

Näin tarvittava 5.6/6.3 fraktio saatiin erotettumaan. Kaikkiin käytettyihin seulasarjoihin kuului myös pohja ja kansi.

### 3.3 Runkoaineen välppäys

Kun kiviaines oli seulottu sopiviin fraktioihin, välpättiin yli 4 mm:n kiviaines muotoarvonsa mukaan litteisiin ja pyöreisiin kiviin (Kuva 5). Välppäys ei menetelmänä sovellu hienolle, alle 4 mm:n kiviainekselle. Välppäyksessä välppäseulan läpäissyt materiaalin on litteää kiviainesta ja välppäseulalle jäänyt on pyöreää kiviainesta. Välppäys toimintana muistuttaa hyvin pitkälti seulontaa. (SFS-EN 933-3, 4).

Taulukko 3. Valppäseulakoot (SFS-EN 933-3)

Raekokolajite $d_i/D_i$ mm	Välppäseulojen rakokoko mm
80/100	$50 \pm 0,5$
63/80	$40 \pm 0,5$
50/63	$31,5 \pm 0,5$
40/50	$25 \pm 0,4$
31,5/40	$20 \pm 0,4$
25/31,5	$16 \pm 0,4$
20/25	$12,5 \pm 0,4$
16/20	$10 \pm 0,2$
12,5/16	$8 \pm 0,2$
10/12,5	$6,3 \pm 0,2$
8/10	$5 \pm 0,2$
6,3/8	$4 \pm 0,15$
5/6,3	$3,15 \pm 0,15$
4/5	$2,5 \pm 0,15$

Seulotun kiviaineksen välppäykseen oli käytössä yksi välppäseulasarja. Tarvittavat välppäseulakoot olivat 2.5, 3.15, 4., 5, 6.3, ja 8 (Taulukko 3). Seulakoko 5 vastaa seulakokoa 5.6 (by 43 2009). Suurin välpättävä raekokolajite oli 12.5/16 ja sitä välpättiin koon 8 välppäseulalla. Välppäyksen tehostamiseksi ja ajan säästämiseksi muodostettiin kaksi seulasarjaa, joihin kuului sekä tavallisia seuloja että välppäseuloja. Seulontakoneet ajastettiin toimimaan 10 minuutin erolla toisiinsa. Välppäys aika oli 20 minuuttia per välppäsarja. Yhdellä välppäsarjalla välpättiin kerrallaan noin 1,5 kilogramman suuruinen kiviaines määrä. Näillä toiminnoilla varmistettiin rakeiden toisistaan erottuminen. TS tarkoittaa tavallista seulaa, VS välppäseulaa, P pohjaa ja K kantta.

Ensimmäiseen välppäsarjaan kuului:

P,

0.50 TS,

2.5 VS,

1.0 TS,

3.15 VS,

2.0 TS,

4 VS,

K

Toiseen välppäsarjaan kuului:

P,

4 TS,

5 VS,

5 TS,  
6.3 VS,  
6.3 TS,  
8 VS,  
K

Tavallisten seulojen koot valittiin siten, etteivät erikokoiset välpättävät kiviainekset sekoitu keskenään. Välpätty kiviaines jaettiin sankoihin muotoarvonsa mukaan. Yhdestä valpätystä kiviaineksestä jakautui kaksi erillistä sankoa. Välppäseulan läpäissyt litteä kiviaines merkittiin kirjaimella F (flaky) ja pyöreä, välppäseulaa läpäisemätön kiviaines merkittiin kirjaimella C (cubic).

Välppäys suoritettiin, koska yksi testimuuttujista oli muotoarvo eli tässä tapauksessa partikkelien litteys. Välppäämällä litteät ja pyöreät partikkelit erilleen, pystyttiin muodostamaan testibetonimassoja varten runkoainetta, jonka litteysluokka oli 30. Litteysluokaltaan 30 olevassa kiviaineksessa on 30 % välppäseulan läpäisevää litteämpää kivimateriaalia.



Kuva 5 Vasemmalla pyöreitä ja oikealla litteitä partikkeleita. (Palviainen 9.4.2013)

### 3.3.1 Litteysluku

Litteysluku, Flakiness index, kuvaa litteiden rakeiden osuutta kiviaineksestä (Taulukko 2). Litteiden rakeiden osuuskiviaineksestä saadaan selville välppäseuloilla (Kuva 6). Välppäyksen tuloksena saadaan litteiden rakeiden osuus prosentteina alkuperäisen näytteen massasta. (by 43 2009, 19.)

Taulukko 2. Luokitustaulukko litteysluvun enimmäisarvolle (by 43 2009, 19)

Litteysluku	Litteyslukuluokka (FI)
$\leq 10$	FI <sub>10</sub>
$\leq 15$	FI <sub>15</sub>
$\leq 20$	FI <sub>20</sub>
$\leq 35$	FI <sub>35</sub>



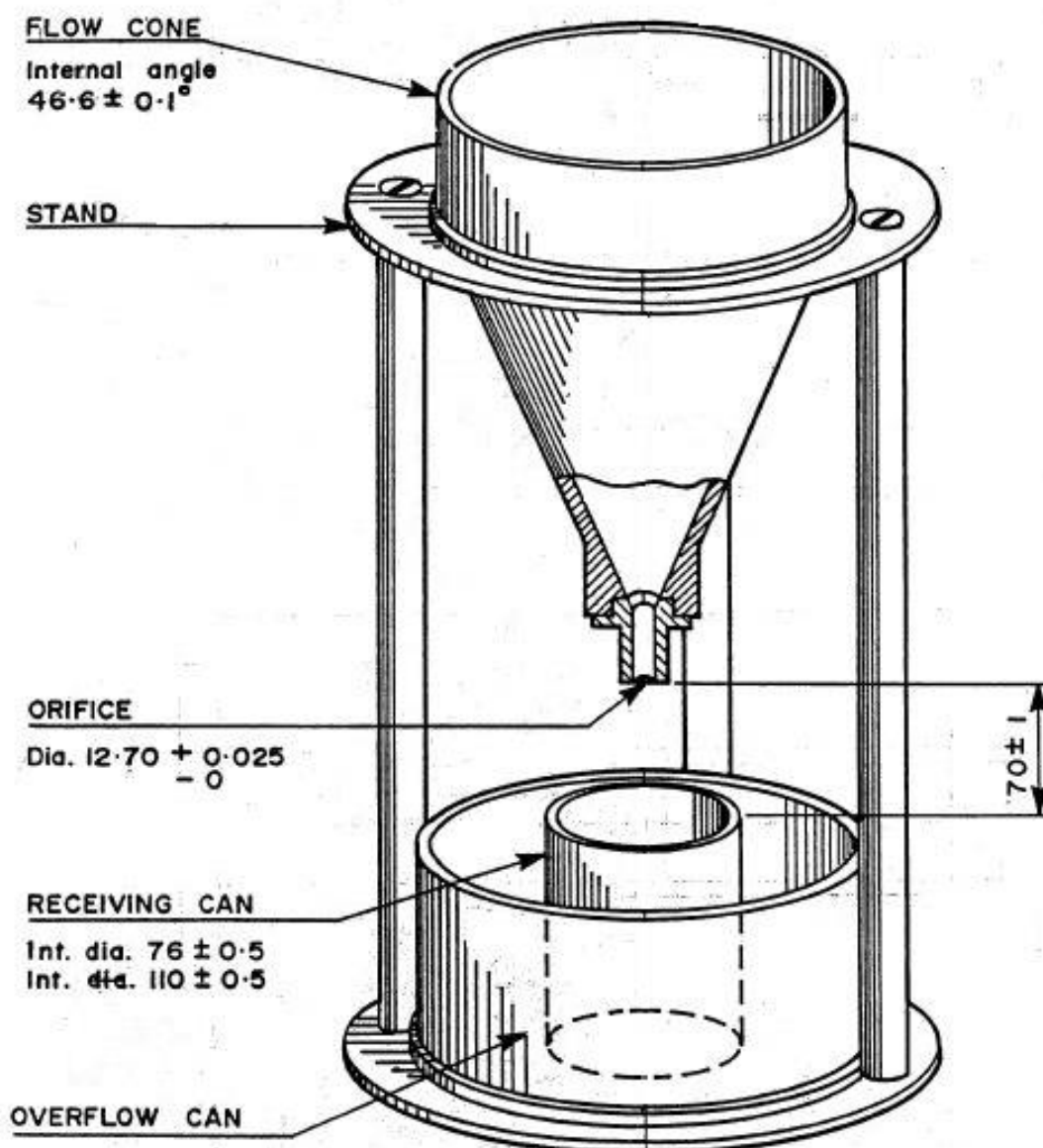
Kuva 6. Kuvassa vasemmalla koon 8.0 tavallinen seula ja oikealla koon 5.0 välppäseula (Lehtikanto 14.3.2014)

## 4 NEW ZEALAND FLOW CONE

### 4.1 Testilaitteiston valmistus ja testin valmistelu

Valppäys ei sovellu alle 4 mm:n kokoisen kiviaineksen muotoarvon määrittämiseen. Tavoitteena oli erottaa hyvä ja huonomuotoinen kiviaines myös alle 4 mm:n kiviaineksista. Karkeasti ilmaistuna hyvämuotoinen on pyöreää ja huonomuotoinen litteää. New Zealand Flow Cone menetelmä soveltuu alle 4 millimetrin kiviainekselle, kun halutaan selvittää sen muoto-ominaisuuksia. Flow Cone testissä alle 4 mm:n kiviainesta valutetaan testilaitteiston läpi sylinterin muotoiseen astiaan. Aika, mikä kiviainekselta kuluu valua testilaitteiston läpi ja irtotiheys, jonka arvo saadaan punnitsemalla sylinteriin valunut kiviaines, kertovat kiviaineksen muotoarvosta.

Valmista testilaitteistoa ei ollut saatavilla, joten se tehtiin itse. Itse valmistetun testilaitteiston esikuvana olivat valokuvat ja tekniset tiedot tarkkuusvalmistetusta Flow Cone laitteistosta (Kuva 7).



Kuva 7. Flow Cone laitteisto teknisine tietoineen (NZS 3111:1986)



Itse valmistettu Flow Cone laitteisto (Kuva 8) koostui Vebe-laitteesta, muovisesta suppilosta, sylinterinmuotoisesta metallisesta astiasta, leikatusta 10 litran valkoisesta sankosta, 150 mm:n kokoisten betonivalulieriömuottien 15 mm paksuista metallisista kansista ja 3 mm paksusta pleksistä. Suppiloa lukuunottamatta tarvemateriaali saatiin Savonia-ammattikorkeakoulun betonilaboratorion tiloista.



Kuva 8 Itse valmistettu Flow Cone laitteisto, 14,5 mm:n suuaukkoisen suppilo (Palviainen 4.4.2013)

Testilaitteistosta ei tarvinnut saada täysin esikuvansa kaltaista, mutta sillä tuli pystyä saamaan luotettavia vertailuarvoja 70 m/s ja 50 m/s kiviaineksille. 70 m/s ja 50 m/s kiviaineksista saatuja arvoja verrattiin myöhemmin toisiinsa muotoarvojen selvittämiseksi. Oleellisia asioita testin onnistumisen



kannalta olivat, ettei valutettava näyte tukkinut suppiloa, valittu näyte täytti sylinterin täysin ja mahdollisimman pieni määrä näytettä valui ylivalumisastiaan, näytteen putoamiskorkeus sylinteriin oli vakio ja valumisaikojen mittaajan refleksit olivat kunnossa.

Sovimme tilaajan kanssa että Flow Cone suoritetaan seulotuille 0.25/0.5, 0.5/1.0, 1.0/2.0 ja 2.0/4.0 fraktioille. Tällä pyrittiin vakioimaan muotoarvot kyseisille fraktioille. Alle 0.25 mm raekooltaan olevalle, hienommalle kiviainekselle ei Flow Conea suoritettu. Johtopäätös hienomman kiviaineksen muotoarvosta tehtiin edellä mainittujen fraktioiden Flow Cone testien perusteella.

Pidempi valuma-aika ja pienempi irtotiheys tarkoittavat huonompaa partikkelien muotoarvo fraktiossa (Ruuskanen, 1.3.2013).

Uuden Seelannin Flow Conea koskevan standardin (NZS 3111:1986) mukaan suppilon suuaukon tulisi olla  $12,70 \pm 0,025$  mm. Testeissä käytetyn suppilon suun aukeamaa jouduttiin suurentamaan 14,5 mm:iin, koska tätä pienemmällä suuaukolla 2.0/4.0 näytteet tukkivat suppilon ja näytteen valuminen sylinteriin pysähtyi. Tämä voi johtua käytetyn suppilon materiaalista ja esikuvaansa loivemmasta suppilon kulmasta. Standardin mukaisessa testilaitteistossa suppilo on alumiinia ja suppilon kulma on jyrkempi. Suurennetusta suppilon suuaukosta huolimatta 2.0/4.0 kiviaineksen valuttaminen suppilon läpi oli haasteellista. Onnistuneiden mittausten saamiseksi jouduttiin tekemään useita uusintatoistoja, koska suppilo pyrki tukkeutumaan valutettavasta 2.0/4.0 näytteestä.

Suppilon suuaukon kokoa ei haluttu suurentaa enempää. Liian suurella suuaukolla eri fraktioiden valumisajat olisivat mahdollisesti olleet liian lähellä toisiaan, eikä havaittavaa eroa mittausajoissa olisi syntynyt. Mikäli kiviaines valuisi suppilosta liian nopeasti, saattaisi tämä aiheuttaa hiekan pakkautumista sylinteriin, mikä vääristäisi irtotiheyttä.

Sylinterin tilavuuden ja harjoitus Flow Cone testien perusteella sopivaksi näytteen kooksi valittiin 1050g. Testattavat näytteet punnittiin etukäteen valmiiksi lasipurkkeihin (Kuva 9).



Kuva 9. Flow Cone testiä varten punnitut testinäytteet. Numeroilla 0.25 ja 4 merkityssä purkissa on 0.25 - 0.5 mm:n kokoista ja 70 m/s nopeudella murskattua kiviainesta (Palviainen 23.3.2013)

Flow Conen suorittaminen eteni seuraavasti:

1. Uunikuivatun (110  $\pm$  5 C) hiekan tiheys määritettiin ja alle 4 mm kokoisesta kiviaineksesta punnittiin sopivan kokoinen hiekanäyte testiä varten.
2. Määritettiin veden massa, joka täytti hiekan vastaanottavan sylinterin.
3. Testinäyte asetettiin puhtaaseen lasipurkkiin ja kansi suljettiin tiiviisti. Lasipurkkia ravistettiin voimakkaasti 30 sekuntia.
4. Tarkastettiin että testilaitteisto on kunnossa ja oikein aseteltuna paikoilleen.
5. Sormi asetettiin hiekanvalutussuppilon suulle. Testinäyte asetettiin suppiloon varoen. Sormi poistettiin suppilon aukon suulta ja aikaa laskeva sekuntikello käynnistettiin samalla hetkellä.
6. Kun kaikki hiekka oli valunut pois suppilosta, sekuntikello pysäytettiin ja valuma-aika merkittiin muistiin.
7. Sylinteriin valuneen hiekan pinta tasattiin hellävaroin, vaakasuorin ja lyhyin liikkein. Apuna, tasoituspalkkina käytettiin jäykkää ja tasaista viivoitinta. (Hiekan tiivistymistä pyrittiin välttämään)
8. Sylinteriin tasaamisen jälkeen jääneen hiekan massa punnittiin ja tulos merkittiin muistiin.
9. Sylinterin ja ylivalumisastian hiekat sekoitettiin keskenään.
10. Vaiheet 3.-8. toistettiin kolmesti.
11. Lopuksi koko testinäyte punnittiin ja saatua massan kokoa verrattiin alkuperäiseen testinäytteen massa. Mahdollinen testinäytteen hukka/katoaminen merkittiin muistiin.



Kuva 10. Kiviaines valuu sylinteriin, 13 mm:n suuaukkoinen suppilo (Palviainen 5.4.2013)

Flow cone testi suoritettiin 0.25/0.5 ja 0.5/1.0 fraktioille kahdesti, fraktiolle 1.0/2.0 kolmesti ja 2.0/4.0 fraktiolle neljästi riittävän varmuuden aikaansaamiseksi. Tämän lisäksi fraktioille 0.25/0.5, 0.5/1.0 ja 1.0/2.0 suoritettiin vertaileva flow cone testi 13 mm:n suuaukkoisella muovisella suppilolla (Kuva 10). Tässä testissä suppilon suuaukon koko ja suppilon kulma muuttuivat. Muut tekijät ja etäisyydet kuten valumiskorkeus säädettiin samoiksi kuin 14,5 mm:n suuaukkoisen suppilon flow cone testissä.

Irtotiheys laskettiin seuraavalla kaavalla:

$$\left(1 - \frac{1000 B}{AD}\right) \times 100,$$

jossa

$A$  = sylinterin täyttävän veden massa grammoissa

$B$  = sylinteriin valutetun kiviaineksen massa grammoissa (kolmen mittauksen keskiarvo)

$D$  = sylinteriin valutetun kiviaineksen tiheys

Flow Cone testin perusteella jokaiselle valutetulle kiviainesnäytteelle saatiin valuma-aika ja irtotiheys. Saadut valuma-aika ja irtotiheystulokset olivat ristiriidassa suhteessa toisiinsa. Koska kiviaineksen valumiseen liittyi epävarmuustekijöitä ja karkeimmat kiviainekset pyrkivät tukkimaan suppilon, sovimme tilaajan kanssa irtotiheyden olevan määräävämpi tekijä testimassoja valmistettaessa. Flow Conen lopputuloksena 2 - 4 mm:n kiviaineksista pyöreämpää eli muotoarvoltaan parempaa oli 50 m/s roottorin nopeudella murskattu kiviaines ja alle 2 mm:n kiviaineksista parempi muotoista oli 70 m/s nopeudella murskattu kiviaines.

## 5 KOEOHJELMAN SUUNNITTELU JA VALMISTELU

### 5.1 Koeohjelman suunnittelu

Tuorebetonitestejä ja betonin lujuustestejä varten suunniteltiin minuuttiaikataulu ja valmistettiin testi-laattoja varten tarvittavat valumuotit. Kun tarvittava testivälineistä oli valmiina, harjoiteltiin testivälineiden käyttöä ja testien suorittamista. Tätä varten valmistettiin muutamia harjoitusmassoja. Aikataulun suunnittelua varten valmistettiin erityiskoemassa. Massa valmistettiin samalla kaavalla mitä yksi testimassoista tuli olemaan. Kaava oli sama, mutta määrä oli lopullista testimassa pienempi. Testimassan perusteella pyrittiin hakemaan suuntaviivat lopulliselle aikataululle.

Testirupeamat oli tarkoitus pitää tiiviinä, johtuen allekirjoittaneen kiireisestä perhe-elämästä. Esimerkiksi betonikuutioiden puristuskokeet oli tarkoitus puristuskoestaa seitsemän vuorokauden jälkeen, mutta käytännön syistä puristuskokeet suoritettiin aina kahdeksan vuorokauden kuluttua valusta. Kokeita ei kuitenkaan mitoitettu liian tiiviisti mahdollisten takaiskujen varalta. Testit, pois lukien osa puristuskokeista, oli tarkoitus suorittaa kahden viikon arkipäivien aikana. Viimeiset puristuskokeet sijoituivat kolmannelle viikolle testien aloittamisesta.

Muottien pinta-alat jaettiin neulakokeita varten kuuteen testausalueeseen ja nauloja varten merkittiin riittävät välietäisyydet suhteessa toisiinsa. Alueet merkittiin tussilla valumuottien reunoihin. Testejä suoritettaessa, apuna käytettiin linjuria, joka selvensi testialueiden välistä rajaa. Naulojen ammunnat tuli suorittaa vähintään 100 mm:n etäisyydelle laatan reunasta ja vähintään 80 mm:n etäisyydelle toisistaan. 300 x 520 mm:n kokoiseen laattaan tuli siis kolme neulatestausaluetta ja siihen mahtui ampumaan kymmenen naulaa. 300 x 400 mm:n kokoiseen laattaa tuli myös kolme neulan testausaluetta ja siihen pystyi ampumaan kuusi naulaa, yhden mahdollisen ammunnan jäädessä reserviin eli varalle.

Testausaikataulu neljälle testattavalle betonimassalle rytmitettiin seuraavasti:

1. päivä MA, 1. testin valmistelu ja testien aloitus: tuorebetonitestien suoritus
2. päivä TI, 1. testin jatkaminen: varhaislujuustestit, muoteista purku ja veteen laitto
3. päivä KE, 2. testin valmistelu ja testien aloitus: tuorebetonitestien suoritus
4. päivä TO, 2. testin jatkaminen: varhaislujuustestit, muoteista purku ja veteen laitto
8. päivä MA, 3. testin valmistelu ja testien aloitus: tuorebetonitestien suoritus
9. päivä TI, 3. testin jatkaminen: varhaislujuustestit, muoteista purku ja veteen laitto, 1. testin kappaleiden puristuskokeet
10. päivä KE, 4. testin valmistelu ja testien aloitus: tuorebetonitestien suoritus
11. päivä TO, 4. testin jatkaminen: varhaislujuustestit, muoteista purku ja veteen laitto, 2. testin kappaleiden puristuskokeet
15. päivä TI, 3. testin kappaleiden puristuskokeet
17. päivä TO, 4. testin kappaleiden puristuskokeet

Tehtyjen koemassojen perusteella päädyttiin seuraavanlaiseen aikatauluun ja se hyväksyttiin opinnäytetyön antajalla:

0 min, massan valmistus alkaa

2 min, sekoitettava materiaali sekoitusastiassa  
 6 min, sekoitusaika päättyy  
 7 min, painuma testi  
 11 min leviämä testi  
 21 min muotteihin valu ja antureiden asennus betonimassan sekaan  
 30 min muottien siirto pommisuojaan (tasaisemmat olosuhteet)  
 8 h 15 min 1. neulasarja  
 9 h 2. neulasarja  
 10 h 3. neulasarja  
 11 h 4. neulasarja  
 12 h 5. neulasarja  
 13 h 6. neulasarja  
 15 h 1. naulasarja  
 17 h 2. naulasarja  
 19 h 3. naulasarja  
 23 h muottien purku ja kuutioiden veteen laitto  
 8 vrk kuutioiden vedestä pois otto, kevyt kuivaus ja puristuskokeet

Ensimmäistä neulasarjaa myöhästytettiin 15 minuuttia testien suorituspaikasta johtuvista käytännönsyistä.

## 5.2 Tarvittavat muotit ja testausvälineet

Tuorebetonitestejä eli painumaa ja leviämää varten tarvittavat välineet löytyvät lueteltuina standardeista SFS-EN 12350-2 ja SFS-EN 12350-5.

Varhaislujuus- ja puristuslujuustestikappaleiden muodostamiseen tarvittiin erilaisia muotteja. Varhaislujuuden kehittymisen testaamisen varten Savonia-ammattikorkeakoulun puulaboratorion tiloissa valmistettiin kaksi vanerimuottia. Reunamitoiltaan muotit olivat 300 x 400 mm:ä ja 300 x 520 mm:ä, korkeuden ollessa kummassakin 50 mm:ä. Näihin muotteihin tuleviin betonilaattoihin suoritettiin varhaislujuuden kehityksen mittaukset eli neulan ja naulan uppoamakokeet. Mittaukset suoritettiin erityisellä tunkeumaneulalla (Penetration needle) ja Hiltin valmistamalla DX 450 naulaimella. Laattojen pinta-ala mitoitettiin ensisijaisesti riittämään naulapyssyllä suoritettavat kokeet. Neulakokeet suoritettiin aiottujen naulojen ampumiskohtien ympärille. Näin betonimassaa varten tarvittavan runkoaineen seulonnan ja välppäyksen määrä saatiin pidettyä mahdollisimman pienenä.

Standardin (SFS-EN 14488-2) mukaan, Hilti DX 450 naulaimella tehtävät kokeet vaativat pienimmillään 100 mm:ä paksun testikohteen. Sovimme tilaajan kanssa että kokeissamme riittävä laatan paksuus on 50 mm:ä. Mikäli laatoista olisi tehty 100 mm:ä paksut, olisi seulonnan määrää pitänyt kaksinkertaistaa. Sovimme myös että laattojen ulkomitat, 300 x 400 mm:ä ja 300 x 520 mm:ä, ovat riittävät, vaikka standardi määrittelee mitoiksi vähintään 500 x 500 mm:ä (SFS-EN 14488-2). Sovimme, että kokeita suoritettaessa betonilaatan lujuudenkehittymistä tuli odottaa niin kauan, kunnes Hiltillä tehtävän kokeen suoritus oli mahdollista. Tämä noin aika pyrittiin löytämään suoritettaessa harjoituskokeita.

Puristuskokeita varten tarvittiin kolme kappaletta kuutioita, jotka olivat särmältään 100 mm:ä. Särmältään 150 mm:ä olevia kuutioita ei käytetty, koska testikappaleita varten tarvittava seulottu ja välpätty runkoainemäärä haluttiin pitää mahdollisimman pienenä.

Kokeiden aikana lämpötilojen kehittymistä seurattiin kolmella anturilla. Anturit olivat kytkettyinä DaqPRO 5300 mittauslaitteeseen. Yksi anturi sijaitsi kuution sisässä, toinen sijaitsi laatan sisässä ja kolmas mittasi huoneilman lämpötilaa. DaqPro 5300 mittauslaite tallensi lämpötilat 10 minuutin välein. Anturit asennettiin kappaleiden valujen yhteydessä ja poistettiin muottinen purkamisen yhteydessä. Valukappaleiden säilytyshuoneen ilmankosteutta seurattiin RH- ja lämpötilamittari EL-USB-2-LCD:llä testien ajan. EL-USB-2-LCD käynnistettiin muottien pommisuojaan tuonnista ja sammutettiin muottien purkamisen jälkeen.

### 5.2.1 Tunkeumaneula Penetration needle

Betonin varhaislujuuden kehittymisen mittaamiseen käytössä oli MAYCON tunkeumaneula (Kuva 11). Tilaaja hankki sen suoraan Meycolta. Laitteen saaminen Kuopioon vei oman aikansa, koska Atlas Copcon ja Meycon yritys fuusio hidastutti toimitusta.



Kuva 11. Penetration Needle (BASF, Mayco Penetration Needle käyttöohje)

Kun nopeasti kovettuvia ruiskubetoneita testataan, neulan käyttöaika rajoittuu yleensä aikavälille 15 - 180 minuuttia tai kunnes lujuus kehittyy yli 1,2 Mpa. Vastaavalla digitaalisella mittauslaitteella on mahdollista mitata 1,5 Mpa asti. (SFS-EN 14487-1, 12; Lindlar ja Jahn 2010, 4.)

Neulan sisällä sijaitsee kalibroitu jousi, jonka toimintaan mittaustulos perustuu. Mittauslaitteen päässä sijaitsee irrotettava neula. Neula on halkaisijaltaan 3 mm:ä ja neulan kärjen kulma on 60 astetta. Mahdollisia vaihto/varaneuloja säilytetään kahvaosan sisällä. Tehdessä suuria määriä mittauksia, kärki kuluu ja kulma muuttuu, jolloin vaihtokärjet ovat tarpeen. (SFS-EN 14488-2)



### 5.2.2 HILTI DX 450 naulain

Hiltin tuotevalikoimista löytyy panosnaulain, jolla on mahdollista tutkia betonin varhaislujuuden kehittymistä (Kuva 12). Samaa naulainta on saatavilla myös rakennuskäyttöön. Testaukseen tarkoitettu paketti sisältää naulaimen, panoksia kolmessa eri värissä, naulojen ulosvetimen, kolmea erimittaista testausnaulaa, suojalasit ja sprayöljypurkin.

Naulaimen käyttöalue on varsin laaja. Valitsemalla sopivan värinen patruuna, sopiva voima-asetus ja sopivan mittainen naula voidaan naulaimella määrittää betoninlujuuksia välille 1 - 56 N/mm<sup>2</sup> (Hilti DX 450 käyttöohje). Virallisesti testimenetelmä soveltuu lujuusalueelle 2 - 16 Mpa (SFS-EN 14487-1).

Ammutun naulan uppoaman ja naulan ulosvetovoiman tai vaihtoehtoisesti vain ammutun naulan uppoaman avulla saadaan selville betonin ammutahetken lujuus.



Kuva 12. Hilti DX 450:n laukku sisältöineen (Palviainen 15.5.2013)

## 6 MASSOJEN VALMISTUS, TUOREBETONITESTIT JA MUOTTEIHIN VALU

### 6.1 Massojen valmistus

Testimassoille suoritettiin painuma- ja leviämätestit. Näillä todennettiin testimassojen notkeutta ja erottumistaipumusta. Painuma ja leviämä kokeiden välissä, sekä leviämäkokeen jälkeen, kokeissa käytetty massa sekoitettiin uudelleen muun valmistetun massan sekaan. Massa pidettiin notkeana muotteihin laittoon asti, lapiota apuna käyttäen.

Betonimyllyn koko vaikutti myös osaltaan valmistettavien betonimassojen kokoon. Käytössä oli kaksi erikokoista betonimyllyä, joiden välinen kokoero oli huomattava. Pienemmällä myllyllä pystyttiin valmistamaan juuri sen kokoinen betonimassa, että se täytti tarvittavat muotit ja vain hieman betonia jäi yli. Mikäli pienemmällä myllyllä yritti valmistaa tätä suuremman massan, osa siitä lensi sekoitusastian laitojen yli. Suurempi mylly olisi vaatinut paljon suuremman valmistettavan betonimassan ja tätä kautta paljon enemmän runkoaineen seulontaa. Suurempaa myllyä käyttämällä olisi ollut mahdollista valmistaa esimerkiksi paksummat testauslaatat, mutta tätä ei pidetty järkevänä opinnäytetyön kokonaistyömäärän suhteen, joten päädyimme käyttämään pienempää betonimyllyä (Kuva 13).



Kuva 13. Käytössä ollut betonimylly, jolla pystyi valmistamaan noin 40 kg betonimassaa yhdellä kertaa. (Palviainen 15.5.2013)



## 6.2 Tuorebetonitestit painuma ja leviämä

Painumakokeessa mitattiin kartiomuotissa olevan betonimassan painuma millimetreissä muotin noston ja massaa tarkasteltiin silmämääräisesti. Painumakokeet suoritettiin heti massojen valmistuksen jälkeen. Painumakoe on esitetty tarkemmin standardissa SFS-EN 12350-2. Ohjeellinen arvo painumalle, ilman sallittuja poikkeamia, on 10 - 210 mm:ä (SFS EN 206-1, 28-29).

Leviämäkokeessa mitattiin kuinka paljon leviämäpöydän päälle, kartion avulla asetettu testibetoni leviää, kun leviämäpöydän levy annetaan pudota 15 kertaa vapaasti pöydän alarajoittimelle. Kaksi suurinta, pöydän sivujen suuntaista, leviämämittaa kirjattiin ylös ja niistä laskettiin keskiarvo. Leviämäkokeet suoritettiin viisi minuuttia massojen valmistuksen jälkeen eli heti painumakokeiden jälkeen. Leviämäkoe on esitetty tarkemmin standardissa SFS -EN 12350-5. Ohjeellinen arvo leviämälle, ilman sallittuja poikkeamia, on 340 - 620 mm:ä (SFS EN 206-1, 28-29).

## 6.3 Muotteihin valu

Kun tuorebetonitestit oli suoritettu, betonimassa valettiin muotteihin. Massa valettiin viiteen muottiin, kahteen laatta- ja kolmeen kuutiomuottiin (Kuva 14). Valun yhteydessä yhteen laattamuottiin ja yhteen kuutiomuottiin asetettiin lämpöanturit.

Laattoja ja kuutioita ei ruiskutettu vaan ne valettiin käsin ja tiivistettiin kevyesti, 16 mm:ä paksua sulloinsauvaa apuna käyttäen. Massaa ei ruiskutettu muotteihin, koska muotit ja testimassamäärät olivat pieniä. Oleellista tulosten vertailtavuuden kannalta oli se että kaikki testimassat käsitellään samalla tavoin, joka vaiheessa.

Laatat valettiin kahdessa kerroksessa ja kuutiot kolmessa. Kerrosten välissä suoritettiin kevyt tiivistäminen, sulloinsauvaa apuna käyttäen. Tiivistysliikkeitä suoritettiin jokaiseen kerrokseen sama määrä. Kuutiokerrokseen suoritettiin 25 liikettä ja laattakerrokseen 200 tai 260 johtuen suuremmasta pinta-alasta. Lopuksi betonipinnat hierrettiin, kevyin liikkein, tasaisiksi poikittaista sulloinsauvaa apuna käyttäen. Valun jälkeen valetut muotit siirrettiin välittömästi lähellä sijaitsevaan pommisuojaan. Pommisuojan olosuhteet olivat aiemman tarkkailun perusteella betonilaboratoriota tasaisemmat. Betonilaboratorion lämpötila vaihteli suuresti, johtuen ajoittain sisälle paistavasta auringosta. Muotit siirrettiin erityistä varovaisuutta noudattaen.



Kuva 14. Testimassa numero 3 valettuna muotteihin (Palviainen 3.6.2013)

## 7 VARHAISLUJUUS

### 7.1 Neulantunkeumamenetelmä Penetration Needle test

Ruiskubetonille sen varhaislujuuden kehitys, 30 minuutista 12 tuntiin on ensisijaisen tärkeää. Ruiskubetonin tulisi kestää porausta kahden - kolmen tunnin kuluttua ja räjäytyksiä viiden – kuuden tunnin kuluttua ruiskutuksesta. (EFNARC 1999,21; BASF, Mayco Penetration Needle)

Neulantunkeumamenetelmällä tutkitaan betonin tai ruiskubetonin varhaislujuuden kehitystä. Käytännössä neulalla testataan kuinka suuri on neulan uppoamista vastustava voima, joka vaaditaan neulan upottamiseen testikohteeseen, 15 mm:n syvyydelle. Tämän vastustavan voiman avulla taulukosta katsotaan betonin sen hetkinen lujuus megapascalina, MPa. Jokaisella mittausajankohdalla neula työnnettiin testikohteeseen kymmenen kertaa, tulokset merkittiin muistiin ja näistä kymmenestä kerrasta laskettiin keskiarvo. Tämän lasketun keskiarvon perusteella oikealta käyrältä katsottiin sen hetkinen betoninlujuus. 0 - 8 ja 0 - 16 mm runkoaineille oli käytössä omat käyränsä. Neulan työntöjä ei saanut suorittaa vasten betonin sisältämiä suurempia partikkeleita eli siitä erottuvia kiviä vasten.

Testeissä ei käytetty nopeasti kovettuvaa rapid-sementtiä, joten betonin varhaislujuuden kehittymisen oli maltillisempaa. Neulaa päästiin käyttämään vasta hieman yli kahdeksan tunnin kuluttua valusta.

Testi aloitettiin, kun valusta oli kulunut kahdeksan tuntia ja viisitoista minuuttia. Toinen mittaus suoritettiin yhdeksän tunnin kohdalla. Tämän jälkeen mittaukset suoritettiin tunnin välein, aina kuuteen tuntiin saakka.

### 7.2 Pulttipyssymenetelmä Stud driving

Kun betoninlujuus oli kehittynyt yli 1,2 MPa, betonin varhaislujuuden kehityksen seuranta jatkettiin Hiltin naulaimella tehtävin testein. Virallisesti menetelmää kutsutaan pulttipyssymenetelmäksi. (SFS-EN 14487-1, 11.)

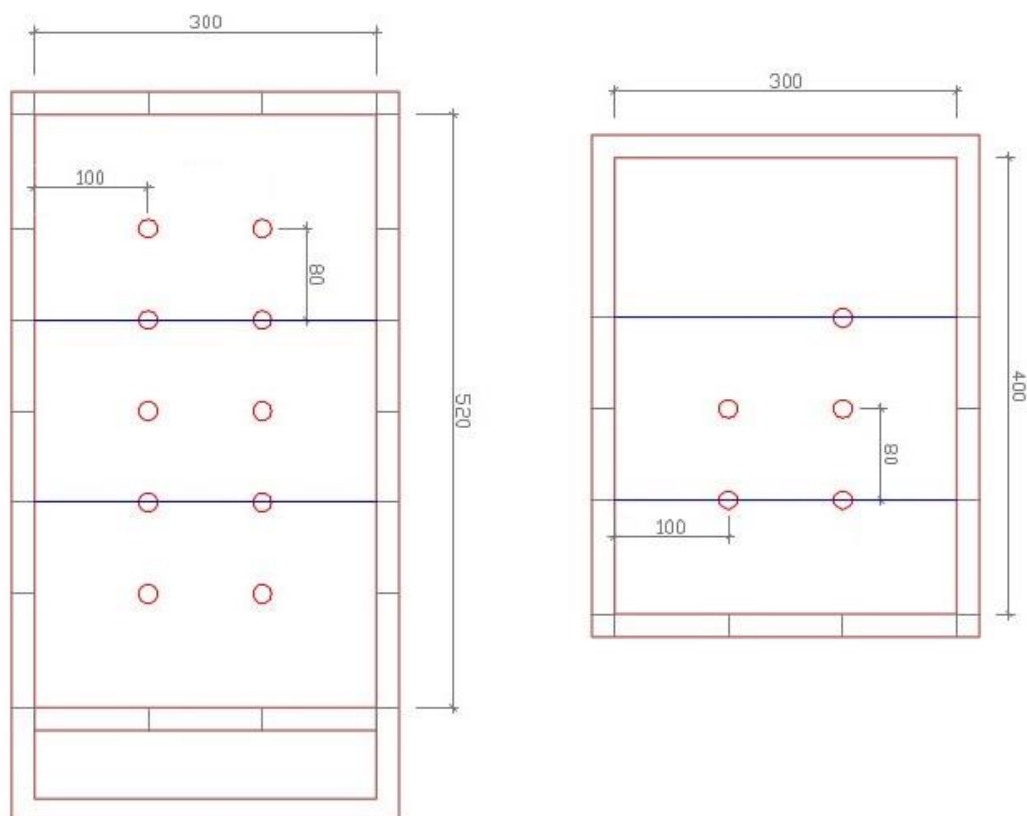
Naulaimen käyttö eteni seuraavasti. Käytössä oli kolmen pituisia testausnauloja, joiden pituudet olivat 60 mm, 80 mm ja 103 mm. Näistä valittiin pisin ja asetettiin se naulaimeseen. Naulain viritettiin varoen ja oikeaoppisesti. Oikeanvärinen, tilanteeseen sopiva patruuna asetettiin paikoilleen. Säätimestä asetettiin tilanteeseen sopiva voima-arvo. Naulaimen suu painettiin betoniin kiinni, suorassa linjassa, siten että suulake painui sisään ja naulain laukaistiin. Testeja suoritettaessa sopiva yhdistelmä oli valkoinen patruuna ja voima-asetus numero 2.

Mikäli naula upposi kokonaan, odotettiin lujuuden lisäkehittymistä. Jos naulan uppoama oli pienempi kuin 20 mm:ä, valittiin lyhyempi naula. Testiä jatkettiin pisimmällä naulakoolla, joka upposi yli 20 mm:ä.

Jokaisella ammunta ajankohdalla suoritettiin viisi naulanammuntaa (Kuva 15). Standardin SFS-EN 14488-2 mukaisessa testissä ammuntoja on kymmenen, mutta opinnäytetyön testit suoritettiin muokailen SIKAn laatimaa ruiskubetonin testausta koskevaa ohjetta, missä riittävä ammuntamäärä on

viisi (Lindlar ja Jahn 2010). Tällä ratkaisulla pyrittiin pitämään testimassojen koko mahdollisimman pienenä. Viiden naulanammunnan keskiarvon perusteella, valkoisille patruunoille tarkoitetulta käyrältä luettiin mittaushetken betoninlujuus.

Mittaukset suoritettiin valetuille betonilaatoille 15, 17 ja 19 tuntia valusta. Osalle testimassoja kaikkia mittauksia ei voitu suorittaa suunnitelluilla ajankohdilla riittämättömästä lujuudenkehityksestä johtuen.



Kuva 15. Periaatekuva naulain- ja neulatestien suorittamisesta. Naulaimella suoritettavat testit tehtiin ympyrällä merkittyihin kohtiin ja neulalla suoritettavat testit sinisillä viivoilla jaettuihin kuuteen lohkokseen. (Palviainen 2.2.2014)

Valetut betonikappaleet purettiin muoteista 23 tuntia valun jälkeen. Lämpötilaanturit irrotettiin ja kuumot laitettiin standardin (SFS-EN 12390-2) mukaiseen vesisäilytykseen odottamaan kahdeksan vuorokauden kuluttua tapahtuvaa puristuslujuustestiä.

## 8 PURISTUSLUJUUS

Testimassojen puristuslujuustestaukset päätettiin suorittaa kahdeksan vuorokauden kuluttua massojen valusta kun yleensä puristuskokeiden ajankohta on 1, 7 ja/tai 28 vuorokautta. Kahdeksaan vuorokauteen päädyttiin aikataulullisista syistä ja näin kaikkien suunniteltujen testien peräjälkeisestä suorittamisesta saatiin ajallisesti yhtenäinen ja järkevä kokonaisuus. Tärkeintä tulosten vertailtavuuden kannalta oli että puristuslujuuden testauksen suoritusajankohta on kaikkien testimassojen puristuskappaleiden kohdalla sama.

Puristettavat kuutiot otettiin pois vesisäilytyksestä noin puolituntia ennen varsinaista puristuslujuus testiä. Puristuslujuustestit suoritettiin standardin (SFS-EN 12390-3) mukaisesti. Apuna puristuslujuustestien suorittamisessa toimi Savonian Tapani Savolainen (rkm). Ennen puristuskoea kuutiot punnittiin painon ja tiheyden selvittämiseksi sekä kuutiot numeroitiin selvyiden vuoksi. Puristuskokeet suoritettiin Savonia-ammattikorkeakoulun betonilaboratoriossa standardin (SFS-EN 12390-4) täyttävällä betonintestauslaitteella ja valukuutiot mitattiin standardin (SFS EN 12390-3) mukaisesti. Mittaukset suoritettiin digitaalisella työntömitalla, jonka kautta mitatut lukemat välittyivät automaattisesti Savonian käytössä olevaan exelpohjaiseen testausselostuspohjaan. Testausselostuspohja oli laadittu siten, että lopulliset puristuslujuustulokset muuntuivat automaattisesti vastaamaan 150 mm:n kuutioiden tuloksia.

Koekappaleiden puristuspinoiksi valittiin muottia vasten olevat pinnat, jotta välttyttiin pintojen tasaamiselta. Kulloinenkin koekappale asetettiin sapluunan avulla puristuskoneen alakuormituslevyn keskelle ja oikea kohta varmistettiin myös alavarmistuslevyssä olevista apuviivoista. Kun puristettava koekappale oli aseteltu paikoilleen, puristuskoneeseen tehtiin tarvittavat säädöt Savolaisen avustamana ja testikappaleiden puristaminen aloitettiin. Puristuksen loputtua, puristuskoneen kilonewtoneissa antama murtovoima kirjattiin ylös ja syötettiin edellä mainittuun valmiiseen Excel-pohjaan (Taulukko 4). Puristus suoritettiin jokaisen testimassan, kaikille kolmelle testikuutiolle ja saadut murtovoima-arvot syötettiin Excel-pohjaan. Taulukosta pystyttiin tämän jälkeen lukemaan testikappaleiden puristuslujuudet megapascalina.

Taulukko 4. Testi numero 2 puristuskappaleiden tulokset

Puristuslujuus Mpa	Tiheys kg/m <sup>3</sup>	Murtovoima kN
1,7	1860	18
2,0	1890	21
1,9	1870	20

## 9 TULOSTEN ANALYSOINTI JA VIRHELÄHTEET

### 9.1 Analysointi

Tehtyjen testien tulokset analysoitiin Taguchin L4-ortogonaalimatriisi (Taulukko 5) pohjalta. Tehtyjen testien tuloksia (A-D) joita analysoitiin olivat leviämä, painuma, lämpötila (lämmönkehitys) eri ajanhetkillä ja betonin lujuus eri ajanhetkillä. Saatujen keskiarvoistettujen tulosten (Taulukko 6) avulla luotiin vastekuvaajia (Kuvio 1) käyttäen apuna Minitab ohjelmaa ja Exceliä.

Taulukko 5. L4-ortogonaalimatriisi

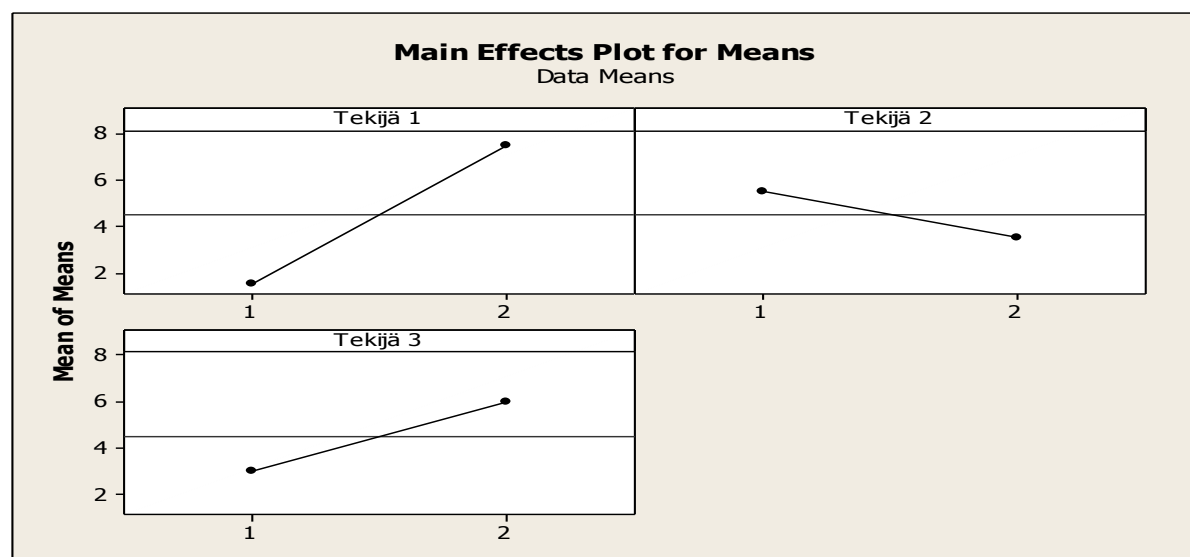
	Tekijä 1	Tekijä 2	Tekijä 3	Tulos
Koe 1	1	1	1	A
Koe 2	1	2	2	B
Koe 3	2	1	2	C
Koe 4	2	2	1	D

Taulukko 6. Vastetaulukko L4-ortogonaalimatriisille

Taso	Tekijä 1	Tekijä 2	Tekijä 3
1	$0.5(A+B)$	$0.5(A+C)$	$0.5(A+D)$
2	$0.5(C+D)$	$0.5(B+D)$	$0.5(B+C)$

Minitab ohjelman esimerkille laskemat vastetulokset:

Level	Tekijä 1	Tekijä 2	Tekijä 3
1	1,500	5,500	3,000
2	7,500	3,500	6,000
Delta	6,000	2,000	3,000
Rank	1	3	2



Kuvio 1. Vastekuvaajia.

Esimerkki vastekuvassa (Kuvio 1) A on 1, B on 2, C on 10 ja D on 5. Kuvasta huomataan että Tekijällä 1 on suurin vaikutus tulokseen eli se on siis tärkein muuttuja. Tekijä 1 saa muuttujalla 2 korkeampia arvoja ja muuttujalla 1 matalampia arvoja. Tekijä 2 ja Tekijä 3 ovat kulmakertoimeltaan lähes yhtä suuria, joten ne vaikuttavat tulokseen lähes yhtä paljon. Helpomman vertailtavuuden vuoksi vastekuvaajat tehtiin myös excelillä. Samaa asiaa kuvaavat vastekuvaajat laitettiin samoihin kuviin. Kuvaajat luotiin painumasta, leviämistä, testimassojen lämpötilan kehityksestä ja lujuuksista.

Vastekuvaajista tarkasteltiin mitkä muuttujat olivat vaikuttaneet eniten mihinkin tulokseen. Vastekuvaajan kulma kertoi muuttuvan tekijän merkityksen suuruudesta ja vastekuvaajan suunta siitä mihin suuntaan muuttava tekijä vei tulosta. Tulosten perusteella esimerkiksi 8 vuorokauden kohdalla mitattuun lujuuden suuruuteen vaikutti eniten käytetty runkoainejakauma ja runkoaine, jossa oli myös karkeampaa kiviainesta mukana, antoi suurempia lujuustuloksia.

Painuman ja leviämisen tulosten suhteen tarkasteltiin kuinka hyvin ne sijoituivat standardissa SFS-EN 206-1 annetuille painuman ja leviämisen ohjealueille. Myös kiviaineksen rakeisuuden ohjealueita (SFS-EN 12620) tarkasteltiin ja otettiin tarkasteluissa huomioon. Tuloksista pääteltiin millä tekijöillä betonimassasta tulee hyvin pumpattavaa ja millä tekijöillä saatiin suurimpia lujuustuloksia. Pumputtavuutta arvioitiin tuorebetonitestien perusteella ja teoreettista 28 vrk lopullista lujuutta arvioitiin 8 vrk lujuustestien ja betonin lujuudenkehitys taulukoiden avulla.

## 9.2 Virhelähteet

Testien onnistunut suorittaminen vaati paljon suunnittelua ja harjoittelua. Tilaisuuksia virheisiin olisi ollut paljon. Kaikkia virhemahdollisuuksia, joihin vaikuttavat inhimilliset tekijät ei täysin pysty sulkemaan pois.

Hienon alle 4 mm:n kiviaineksen Flow Cone testin valuma-aikoja mitatessa oli mahdollista tulla pieniä epätarkkuuksia suhteessa todellisiin valuma-aikoihin. Tämä riippui täysin mittajan reflekseistä ja sekuntikellon pysäyttävästä peukalosta. Valuma-ajat itsessään eivät myöskään olleet täysin luotettavia. Tämä johtui itse tehdyn laitteiston muovisesta suppilosta, joka pyrki hidastamaan tai jopa pysäyttämään valutettavan kiviaineksen.

Tunkeuman neulan käyttö vaati tarkkuutta. Varsinkin suurempia lujuuksia mitatessa neulan pyrkii tahdomattaan työntämään syvemmälle testikohteeseen kuin oli tarkoitus. Neulassa ollut 15 mm:ä kuvaava ura oli hankalasti nähtävissä eikä se erottunut kunnolla. On mahdollista että joillakin neulan työnnöillä neula on upunnut testikohteeseen syvemmälle kuin 15 millimetritä. Tämä on mahdollisesti hieman nostanut yksittäisen neulantyönnön antamaa mittauslukemaa.

Massan sekoitus aika ei välttämättä ollut täysin optimaalinen. Sopiva sekoitusaika arvioitiin tilaajan kokemuksen perusteella, mutta sopivaa sekoitusaikaa ei testattu käytännössä ennen varsinaisia testejä. Tämä johtui tiukalle rajatusta runkoainemäärästä.

## 10 PÄÄTELMÄT

Opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää saadaanko yksinkertaisella murskausprosessilla tuotetusta runkoaineesta laatukriteerit täytettävää ruiskubetonia. Työssä tutkittiin pystyykö yksinkertainen maan alle sijoitettava murskauslaitos tuottamaan ruiskubetonin lujitukseen tarvitavan kiviaineksen. Tavoitteena oli että murskauslaitoksen, yhden murskausvaiheen kiviainesta seulomalla ja siihen notkistinta, vettä ja sementtiä lisäämällä testien tuloksia saadaan standardien mukaisille ohjealueille.

Tutkimuksessa löydettiin suuntaviivat sille kuinka asetetut muuttujat vaikuttivat testimassoihin. Testeistä saatiin selville kuinka käytetty kiviaines ja notkistin vaikuttivat testattujen massojen laatuun. Muuttuvien tekijöiden väliltä löydettiin eroja, jotka vaikuttivat betonin pumpattavuuteen ja lujuuteen. Testimassoista saaduissa tuloksissa oli eroja suhteessa toisiinsa. Osa testimassoista pääsi tavoiteluille ohjealueille. Tutkimuksen tulosten hyödyntäminen ja lisätutkimusten suorittaminen on Normet Oy:n harkinnassa.

Testien valmistelu vaati ajallisesti paljon työtä. Runkoaineen kuivatus, seulonta ja välppäys eli runkoaineen saattaminen testeihin soveltuvaan muotoon vei reilusti aikaa. Tämä johtui käytössä olleiden laitteiden koosta. Suuremmilla seulontalaitteilla ja useammalla kuivatusuunilla olisi aikaa säästynyt huomattavasti ja tätä kautta olisi ollut myös mahdollista valmistaa suurempia testauseriä. Suuremmalla betonimyllyllä valmistettu massa olisi kenties sekoittunut paremmin kuin pienellä betonimyllyllä sekoitettu massa ja massan tarvitsemaa sekoitusaikaa olisi voitu testata tarkemmin ja kenties muuttaa testatun perusteella. Harjoittelumassoja olisi voinut valmistaa enemmän, mikä olisi tarkoittanut vairhaislujuustestien aikataulua. Testilaatoista olisi voinut tehdä standardin vaatiman paksuisia ja pulttipyssyampumisia olisi voinut suorittaa kymmenen kappaletta per mittausajankohta ja mittausajankohtia olisi voinut tilannekohtaisesti lisätä, jos testaus pinta-alaa olisi ollut minimi määrää enemmän. Puristettavia kuutioita olisi voinut valmistaa enemmän ja suorittaa puristuskokeen ainakin 28 vuorokauden ikäisille testikappaleille. 8 vuorokauden iässä suoritettut puristuslujuus testit olisi voinut suorittaa 28 vuorokauden kohdalla. Käytössä olleilla laitteilla ei ajallisesti ja vaivannäöllisesti olisi ollut järkevää tehdä suurempia testimassoja.

Työn suoritus oli haastavaa. Se piti suorittaa erityisellä tarkkuudella, koska varaa virheisiin ei juuri ollut. Testejä varten valmistettujen massojen määrä oli mitoitettu erittäin tiukasti, joten epäonnistunut testi olisi automaattisesti pakottanut kuivaamaan, seulomaan ja välppäämään lisää kiviainesta. Mahdollisissa jatkotutkimuksissa runkoaineen fillerin määrät voisi kaksinkertaistaa ja tutkia kuinka se vaikuttaa lopputulokseen. Hienomman kiviaineksen, alle 4 mm, määrittelyssä määrääväksi tekijäksi voisi valita valuma-ajan. Tämä vaatisi käyttöön oikeista materiaaleista valmistetun Flow Cone laitteiston, jonka avulla voisi saada luotettavia valuma-aika tuloksia.



## LÄHTEET

BASF, Mayco Penetration needle. [Viitattu 10.7.2013] Saatavissa: [http://www.basf-cc.no/nb/produkter/Underjord\\_/Spr%C3%B8ybetong/Documents/MEYCO-Penetration-Needle-E.pdf](http://www.basf-cc.no/nb/produkter/Underjord_/Spr%C3%B8ybetong/Documents/MEYCO-Penetration-Needle-E.pdf)

EFNARC. 1999. Guidelines to the Sprayed Concrete Specification.

EFNARC. 1996. European specification for sprayed concrete.

GEOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS. 2010. Suomen mineraalistrategia. [Viitattu 10.2.2014] Saatavissa: [http://projects.gtk.fi/export/sites/projects/mineraalistrategia/documents/SuomenMineraalistrategia\\_2.pdf](http://projects.gtk.fi/export/sites/projects/mineraalistrategia/documents/SuomenMineraalistrategia_2.pdf)

HILTI, 2009, Determination of the early strength of sprayed concrete with stud driving method Hilti DX-450-SCT. [Viitattu 5.5.2013] Saatavissa: [https://www.hilti.co.uk/fstore/holuk/techlib/docs/Hilti-DX-450-SCT\\_Operating-Instructions\\_2009-01-12.pdf](https://www.hilti.co.uk/fstore/holuk/techlib/docs/Hilti-DX-450-SCT_Operating-Instructions_2009-01-12.pdf)

JAHN Markus, LINDLAR Benedikt. Method Statement Strength Measurement of Shotcrete, [viitattu 2013-09-2] Saatavissa: [www.sika.com/shotcrete/en/shotcrete/sika-sprayed-concrete-topics/sprayed-concrete-applications/measurement-methods.html](http://www.sika.com/shotcrete/en/shotcrete/sika-sprayed-concrete-topics/sprayed-concrete-applications/measurement-methods.html)

JÄRVENPÄÄ, H. 2001. Hienojen kiviainesten laatuominaisuudet ja niiden vaikutusten hallinta betonissa – "Quality Characteristics of Fine Aggregates and Controlling Their Effect on Concrete". Betonilehti 2001 2, 49.

KARJALAINEN, Eero E. 1989. Tuotteen ja prosessin optimointi koesuunnittelulla Taguchi-menetelmällä.

MELBYE, Tom. 2006. Sprayed Concrete for Rock Support.

NZS 3111. 1986. Methods of test for water and aggregate for concrete. Standards New Zealand.

RUUSKANEN, Jaakko 2013-3-1. Normet Oy. [Aloituslaveri.] Kuopio: Savonia-ammattikorkeakoulu.

SFS-EN 206-1. 2005. Betoni. Osa 1: Määrittely, ominaisuudet, valmistus ja vaatimusten mukaisuus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 933-1. 2003. Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus, Osa 1: Rakeisuuden määrittäminen. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 933-3. 2003. Kiviainesten geometrinen ominaisuuksien testaus. Osa 3: Raemuodon määrittäminen. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 14487-1. 2006. Ruiskubetoni. Osa 1: Määritelmät, vaatimukset ja vaatimustenmukaisuus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SFS-EN 14488-2. 2006. Testing sprayed concrete. Part 2: Compressive strength of young sprayed concrete. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto.

SUOMEN BETONIYHDISTYS. 2004. Betoninormit 2012 by 50.

SUOMEN BETONIYHDISTYS. 2005. Betonitekniikan oppikirja by 201.

SUOMEN BETONIYHDISTYS. 2009. Betonin kiviainekset 2008 by 43.